

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д.002.207.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Л. Д. ЛАНДАУ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело №

решение диссертационного совета от 28.06.2019 № 8

О присуждении Фоминову Якову Викторовичу, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний» по специальности 01.04.02 – теоретическая физика принята к защите 22.03.2019 (протокол заседания № 4) диссертационным советом Д.002.207.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук по адресу 142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр-т акад. Семенова, д. 1А приказом № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Фоминов Яков Викторович, 1976 года рождения. В 2003 году защитил диссертацию «Эффект близости и эффект Джозефсона в сверхпроводящих гибридных структурах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в диссертационном совете, созданном на базе Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, работает научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау Российской академии наук. Диссертация выполнена в секторе квантовой мезоскопии ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН.

Официальные оппоненты:

1. Фомин Игорь Акиндинович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук, главный научный сотрудник;
2. Мельников Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, Институт физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»; заведующий лабораторией теории мезоскопических систем, главный научный сотрудник
3. Качоровский Валентин Юрьевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, сектор теории оптических и электрических явлений в полупроводниках, ведущий научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук, Черноголовка, в своем положительном отзыве, составленном заведующим лаборатории сверхпроводимости ИФТТ РАН, д. ф.-м. н. проф. Валерием Владимировичем Рязановым и заверенном ученым секретарем ИФТТ РАН А.Н. Терещенко, указала, что диссертация Я.В. Фомина выполнена и изложена на самом высоком теоретическом уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Диссертация вносит существенный вклад в теоретические исследования взаимовлияния сверхпроводимости и магнетизма в гибридных и неупорядоченных системах, обобщает ряд наблюдаемых явлений с точки зрения проявления особенностей нечетных по частоте сверхпроводящих состояний. Практическая значимость работы связана с развитием теоретических моделей и

подходов, предсказанием новых свойств гибридных структур, имеющих перспективу использования в качестве элементов криоэлектроники. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г. Черноголовка, ИПТМ РАН г. Черноголовка, ИРЭ РАН, г. Москва, ФИ РАН г. Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных российских и международных семинарах и конференциях. По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов диссертационная работа «Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний» соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор – Фоминов Яков Викторович – достоин присуждения искомой степени по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Соискатель имеет 42 опубликованные работы, в том числе 20 работ по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных изданиях:

1. A. F. Volkov, Ya. V. Fominov, K. B. Efetov, *Long-range odd triplet superconductivity in superconductor–ferromagnet structures with Néel walls*, Phys. Rev. B **72**, 184504 (2005).
2. D. A. Ivanov, Ya. V. Fominov, *Minigap in superconductor–ferromagnet junctions with inhomogeneous magnetization*, Phys. Rev. B **73**, 214524 (2006).
3. I. S. Beloborodov, Ya. V. Fominov, A. V. Lopatin, V. M. Vinokur, *Insulating state of granular superconductors in a strong-coupling regime*, Phys. Rev. B **74**, 014502 (2006).
4. P. M. Ostrovsky, Ya. V. Fominov, M. V. Feigel'man, *Proximity effect in the presence of Coulomb interaction and magnetic field*, Phys. Rev. B **74**, 104505 (2006).
5. Ya. V. Fominov, A. F. Volkov, K. B. Efetov, *Josephson effect due to the long-range*

- odd-frequency triplet superconductivity in SFS junctions with Néel domain walls*, Phys. Rev. B **75**, 104509 (2007).
6. Ya. V. Fominov, *Conductance of a junction between a normal metal and a Berezinskii superconductor*, Письма в ЖЭТФ **86**, 842 (2007).
  7. D. A. Ivanov, Ya. V. Fominov, M. A. Skvortsov, P. M. Ostrovsky, *Effective spin-flip scattering in diffusive superconducting proximity systems with magnetic disorder*, Phys. Rev. B **80**, 134501 (2009).
  8. Ya. V. Fominov, A. A. Golubov, T. Yu. Karminskaya, M. Yu. Kupriyanov, R. G. Deminov, L. R. Tagirov, *Superconducting triplet spin valve*, Письма в ЖЭТФ **91**, 329 (2010).
  9. Yasuhiro Asano, Alexander A. Golubov, Yakov V. Fominov, Yukio Tanaka, *Unconventional Surface Impedance of a Normal-Metal Film Covering a Spin-Triplet Superconductor Due to Odd-Frequency Cooper Pairs*, Phys. Rev. Lett. **107**, 087001 (2011).
  10. Ya. V. Fominov, M. Houzet, L. I. Glazman, *Surface impedance of superconductors with weak magnetic impurities*, Phys. Rev. B **84**, 224517 (2011).
  11. P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, I. A. Garifullin, Ya. V. Fominov, J. Schumann, Y. Krupskaya, V. Kataev, O. G. Schmidt, B. Büchner, *Evidence for Triplet Superconductivity in a Superconductor-Ferromagnet Spin Valve*, Phys. Rev. Lett. **109**, 057005 (2012).
  12. P. V. Leksin, A. A. Kamashev, N. N. Garif'yanov, I. A. Garifullin, Ya. V. Fominov, J. Schumann, C. Hess, V. Kataev, B. Büchner, *Peculiarities of performance of the spin valve for the superconducting current*, Письма в ЖЭТФ **97**, 549 (2013).
  13. Yasuhiro Asano, Yakov V. Fominov, Yukio Tanaka, *Consequences of bulk odd-frequency superconducting states for the classification of Cooper pairs*, Phys. Rev. B **90**, 094512 (2014).
  14. Ya. V. Fominov, Y. Tanaka, Y. Asano, M. Eschrig, *Odd-frequency superconducting states with different types of Meissner response: Problem of coexistence*, Phys. Rev. B **91**, 144514 (2015).
  15. P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, A. A. Kamashev, Ya. V. Fominov, J. Schumann,

- C. Hess, V. Kataev, B. Büchner, I. A. Garifullin, *Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in  $\text{CoO}_x/\text{Fe1}/\text{Cu}/\text{Fe2}/\text{Cu}/\text{Pb}$  multilayer*, Phys. Rev. B **91**, 214508 (2015).
16. P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, A. A. Kamashev, A. A. Validov, Ya. V. Fominov, J. Schumann, V. Kataev, J. Thomas, B. Büchner, I. A. Garifullin, *Isolation of proximity-induced triplet pairing channel in a superconductor/ferromagnet spin valve*, Phys. Rev. B **93**, 100502(R) (2016).
17. Yakov V. Fominov, Mikhail A. Skvortsov, *Subgap states in disordered superconductors with strong magnetic impurities*, Phys. Rev. B **93**, 144511 (2016).
18. P. L. Stroganov, Ya. V. Fominov, *Cooper pair splitting in ballistic ferromagnetic SQUIDs*, Phys. Rev. B **96**, 174508 (2017).
19. Andrey A. Kamashev, Aidar A. Validov, Joachim Schumann, Vladislav Kataev, Bernd Büchner, Yakov V. Fominov, Ilgiz A. Garifullin, *Increasing the performance of a superconducting spin valve using a Heusler alloy*, Beilstein J. Nanotechnol. **9**, 1764 (2018).
20. S. V. Bakurskiy, Ya. V. Fominov, A. F. Shevchun, Y. Asano, Y. Tanaka, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, M. R. Trunin, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, Y. Maeno, *Local impedance on a rough surface of a chiral p-wave superconductor*, Phys. Rev. B **98**, 134508 (2018).

Указанные в диссертации сведения об опубликованных работах достоверны. Основная часть результатов получена лично соискателем.

На диссертацию поступили только положительные отзывы. В них отмечается актуальность работы, важность полученных научных результатов и их новизна. В отзывах оппонентов и ведущей организации сделаны следующие критические замечания:

1. Слово, которое, следовало бы писать как «пароразрушающий» (pair-breaking по-английски), пишется как «параразрушающий».
2. На стр. 39, перед формулой (1.85) аномальная часть функции Грина пропорциональна вектору в спиновом пространстве. В тексте предлагается считать, что этот вектор направлен вдоль оси z, однако, этот вектор вообще

говоря – комплексный и выбор оси  $z$  может потребовать пояснений. Разумеется, выбор оси не может повлиять на полученный результат.

3. Представляется несколько искусственным и немотивированным представленный в первой главе избыточно подробный анализ нечетной по частоте сверхпроводимости, возникающей самостоятельно, а не как наведенные сверхпроводящие корреляции. Все дело в том, что, как в итоге продолжительного анализа заключает сам автор, такие корреляции оказываются нереализуемыми ни в какой разумной физической модели, гамильтоново описание таких систем оказывается невозможным, а их появление приводит к различным противоречиям. В свете этого отрицательного вывода самого диссертанта не вполне ясна целесообразность введенной автором новой классификации сверхпроводящих фаз по симметрии, учитывающей диамагнитные сверхпроводящие корреляции, нечетные по частоте. Эта классификация даже включена в третий основной результат диссертации. И в этом же результате сам автор указывает на невозможность физической реализации упомянутых выше сверхпроводящих фаз. Я бы считал, что физически нереализуемые состояния в системах, не описываемых никаким гамильтонианом, не следовало бы обсуждать с самого начала, и тем более не имело смысла упоминать их в основных результатах.
4. Представляется, что в разделе 1.2, посвященном анализу проводимости контакта нормального металла и системы с нечетными по частоте корреляциями, следовало бы больше внимания уделить сопоставлению результата в пределе малой прозрачности интерфейса с предыдущими работами. Дело в том, что в этом пределе ответ должен быть пропорционален плотности состояний в системе с наведенными нечетными по частоте корреляциями. Если в качестве экспериментально возможной реализации решаемой задачи мы рассматриваем контакт между нормальным электродом и ферромагнетиком с нечетными по частоте сверхпроводящими корреляциями наведенными за счет эффекта близости (в структуре сверхпроводник – ферромагнетик), то соответствующая плотность состояний в ферромагнетике

и ее превышение над плотностью состояний в отсутствие сверхпроводящих корреляций обсуждались во многих предшествующих работах (см., например, обзор А.Буздина в Rev.Mod.Phys. 2005 г.).

5. Представляется, что при анализе поведения поверхностного импеданса сверхпроводника с р-спариванием в первой главе следовало бы проанализировать возможное появление вблизи поверхности спонтанных токов, проблема наблюдения которых для  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  обсуждается в литературе. Учтены ли эти токи в представленном расчете? Если нет, то каковы аргументы диссертанта в пользу их отсутствия? Появление таких токов могло бы существенно повлиять на ответ для импеданса.
6. В нескольких местах автор приводит важные результаты, полученные формальным образом, без пояснения физической картины явления. Например, отрицательный знак сверхтока в формулах (1.72)-(1.73) представляет собой весьма интересный результат, который, на мой взгляд, требует более подробного обсуждения, проясняющего физическую картину явления.
7. На рисунке 2.4 приведена зависимость критической температуры в SFF структуре от угла поворота спинов между двумя ферромагнитными слоями при различных значениях геометрических параметров структуры. Из рисунка видно, что зависимость может иметь качественно разный вид: от плавной до достаточно резкой с переходом к нормальному металлу в некоторой области углов. Соответствующий параметр, контролирующий переход от одного режима к другому, в диссертации не приводится. Также отсутствуют качественные физические пояснения.
8. На рисунке 3.36 представлена диаграмма, описывающая процесс нелокального рассеяния с переворотом спина. На первый взгляд, помимо данной диаграммы, должна быть учтена диаграмма, в которой примесная лестница накрывается «шляпкой», описывающей спин-флип процесс. Возможность отбрасывания такой диаграммы в диссертации не обсуждается ни на формальном, ни на качественном уровне.
9. В системе сверхпроводящих и нормальных гранул, изображенной на рис. 4.1,

по мере увеличения поля происходит переход от двухчастичного транспорта куперовских пар к одночастичному транспорту отдельных электронов. Хотелось бы понять, происходит ли этот переход плавно, или же существует некоторое критическое значение магнитного поля, разделяющее два типа транспорта.

10. Для оценки места работ диссертанта в общем потоке исследований был бы полезен более подробный общий обзор или обзоры по главам предшествующих теоретических и экспериментальных результатов по теме диссертации. В частности, более подробное обсуждение работ по исследованиям парамагнитных откликов нечетных по частоте сверхпроводящих состояний, проблемы устойчивости объемного нечетного по частоте сверхпроводящего состояния с парамагнитным откликом и т.п.
11. На стр. 20 отмечено, что существование нечётной по частоте дальнедействующей триплетной компоненты в SF структурах с неоднородной намагниченностью «было предсказано в работе [39], а В ДАЛЬНЕЙШЕМ обсуждалось также в работе [40]». Вместе с тем работа [40] Кадигрובהа и др. опубликована в 2001 г. в номере от 1 мая, а работа Бергерета и др. – в том же году в номере от 30 апреля. Таким образом, справедливее было бы использовать слово «НЕЗАВИСИМО» вместо «В ДАЛЬНЕЙШЕМ».
12. В разделе 1.2 для контакта нормального металла и сверхпроводника Березинского рассмотрен только предел малых энергий, сравнимых с энергией Таулеса. Не меньший интерес представляет случай более высоких энергий, сравнимых с энергетической щелью в сверхпроводнике.
13. В разделе 1.4 при сравнении с экспериментом явно недостает адекватных теоретическому рассмотрению экспериментальных данных. Декларируется качественное согласие, основанное на наблюдаемых больших значениях активной части ( $R$ ) поверхностного импеданса при низких температурах и отсутствии когерентного пика. Однако, при внимательном сравнении теоретических и экспериментальных результатов, можно видеть, что монотонный температурный рост реактивной части импеданса ( $X$ ),



наблюдаемый в эксперименте при сравнительно низких частотах, в теории существует только вблизи «околощелевых» частот (Рис. 1.19 d). А предсказанное аномальное превышение активной частью импеданса реактивной части не наблюдается совсем.

14. Исследования последней четвертой главы несколько выпадают из общей тематики диссертации, связанной с взаимовлиянием сверхпроводимости и магнетизма. Следовало бы хотя бы как-то обосновать появление этой главы в диссертации (связать, например, с близостью рассматриваемых проблем, техники вычислений и т.п.).

На все поступившие вопросы и замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами в области мезоскопической физики, физики сверхпроводимости и гибридных структур, а ведущая организация — признанным научным институтом в данной области.

Диссертационный совет отмечает, что совокупность выполненных соискателем исследований представляет собой самостоятельную законченную высококвалифицированную научную работу. В диссертации исследованы особенности дальнедействующей триплетной сверхпроводимости в системах сверхпроводник-ферромагнетик (SF) с неелевскими доменными стенками. Исследована проводимость контакта между нормальным металлом и сверхпроводником Березинского. Построена классификация сверхпроводящих состояний с учётом обсуждаемых в литературе нечётных по частоте корреляций с двумя различными типами мейснеровского отклика. Исследован локальный импеданс на диффузной поверхности кирального р-волнового сверхпроводника, в частности роль нечётной по частоте компоненты. Исследован эффект сверхпроводящего триплетного спинового клапана за счёт генерации нечётных по частоте корреляций в системе SFF. Исследованы процессы переноса тока, связанные с расщеплением куперовских пар в баллистических СКВИДах с

ферромагнитными фильтрами в рукавах, и возможность управления характеристиками СКВИДа за счёт изменения относительной ориентации фильтров. Исследована возможность описания магнитного беспорядка в диффузных сверхпроводящих гибридных структурах как эффективного рассеяния с переворотом спина. Исследован поверхностный импеданс в диффузных сверхпроводниках со слабыми неборновским магнитными примесями. Исследованы «хвосты» плотности состояний в диффузных сверхпроводниках с сильными магнитными примесями. Исследована возможность возникновения при приложении магнитного поля диэлектрического состояния в гранулированном сверхпроводнике в режиме хорошей межгранульной проводимости. Исследован эффект близости в нормальной грануле в присутствии кулоновского взаимодействия и магнитного поля.

Теоретическая значимость исследования обоснована следующими основными результатами, полученными в диссертации:

1. Построена теория SF и SFS контактов с неелевской доменной структурой. Показано, что в доменных стенках возникает нечётная по частоте дальнодействующая триплетная компонента. Вычислен вклад этой компоненты в плотность состояний, а также обусловленный ею джозефсоновский ток в SFS контакте. В пределе толщины ферромагнитного слоя, малой по сравнению с глубиной проникновения дальнодействующей компоненты, обнаружено, что контакт находится в  $\pi$ -состоянии.
2. Исследована проводимость контакта между нормальным металлом и сверхпроводником, имеющим симметрию, предложенную Березинским. Результаты качественно отличаются от случая обычного сверхпроводника и могут быть использованы для экспериментального обнаружения нечётной по частоте компоненты.
3. Построена обобщённая классификация сверхпроводящих состояний с учётом обсуждаемых в литературе нечётных по частоте корреляций с двумя различными типами мейснеровского отклика. В этом случае в зависимости от сочетания частотной симметрии, спиновой симметрии, пространственной

чётности и типа отклика имеется восемь типов состояний. Показано, что эти восемь типов состояний делятся на две несмешивающиеся группы, причём нечётные по частоте состояния с диамагнитным и парамагнитным откликом принадлежат разным группам. Далее показано, что из двух групп сверхпроводящих состояний, порождаемых однородными сверхпроводниками произвольной симметрии, физически может реализовываться только группа, содержащая парамагнитные нечётные по частоте состояния.

4. Построена теория локальной комплексной проводимости и обусловленного ею поверхностного импеданса  $Z = R - iX$  на диффузной границе кирального  $p$ -волнового сверхпроводника. Изучены аномальные особенности поверхностного импеданса, связанные с генерацией вблизи границы нечётных по частоте сверхпроводящих корреляций; показано, что эти корреляции могут приводить к соотношению  $R > X$ . Дано микроскопическое объяснение наблюдаемого в экспериментах на  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  аномально большого вклада нормальных электронов при низких температурах.
5. Построена теория сверхпроводящего триплетного спинового клапана в системе типа SFF. Показано, что критическая температура системы  $T_c$  может быть немонотонной функцией угла  $\alpha$  между намагниченностями двух F слоёв, достигающей минимума при промежуточном значении  $\alpha$ , лежащем между параллельным (P,  $\alpha = 0$ ) и антипараллельным (AP,  $\alpha = \pi$ ) случаями. Показано, что при определённых параметрах зависимость  $T_c(\alpha)$  имеет возвратный характер. При рассмотрении только P и AP конфигураций обнаружено, что в зависимости от параметров системы возможен как «стандартный» ( $T_c^P < T_c^{AP}$ ), так и «обратный» ( $T_c^P > T_c^{AP}$ ) эффект переключения. Проведён теоретический анализ экспериментов, подтвердивших как триплетный эффект спинового клапана, так и обратный эффект переключения; получено согласие теории и эксперимента.
6. Исследован особый тип сверхпроводящего спинового клапана, представляющий собой баллистический СКВИД со спиновой фильтрацией в рукавах за счёт полуметаллических ферромагнетиков. Джозефсоновский ток в

этом случае полностью обусловлен процессами с расщеплением куперовских пар и качественным образом меняется в зависимости от относительной ориентации намагниченностей фильтров. Исследованы особенности ток-фазовой характеристики (её амплитуда и форма, переход в состояние  $\pi$ -контакта) и критического тока (немонотонность в зависимости от угла между намагниченностями и магнитного потока).

7. Построено эффективное описание слабого магнитного беспорядка с произвольной корреляционной длиной как рассеяния с переворотом спина в задаче об эффекте близости в диффузной системе, составленной из сверхпроводящих и нормальных (или ферромагнитных) областей с магнитным беспорядком. Это локальное описание применимо на масштабах много больше корреляционной длины беспорядка.
8. Исследовано влияние подщелевых примесных состояний на диссипацию (проявляющуюся в проводимости и поверхностном импедансе) в диффузном сверхпроводнике со слабыми неборновскими магнитными примесями при произвольном соотношении между температурой, частотой и величиной подавления щели в случае, когда все три параметра малы по сравнению со щелью БКШ. Показано, что примесные состояния, возникающие при малых плотностях магнитных примесей, могут служить ловушками для неравновесных квазичастиц, уменьшая поглощение в некотором диапазоне низких частот электромагнитного поля.
9. Построена теория «хвостов» плотности состояний в диффузных сверхпроводниках с сильными магнитными примесями, подчиняющимися статистике Пуассона. В то время как по теории среднего поля все края спектра (включая края примесной зоны) являются резкими, инстантонный подход в технике репличной сигма-модели позволяет найти размытие этих краёв и хвосты плотности состояний. Физически хвосты связаны с флуктуациями потенциального (обычные примеси; мезоскопические флуктуации) и непотенциального (магнитные примеси) беспорядка. Показано, что неоднородность концентрации магнитных примесей приводит к появлению

подщелевых состояний за счёт двух механизмов: флуктуаций паразитирующего параметра (магнитный аналог мезоскопических флуктуаций) и флуктуаций параметра порядка (определяемого самосогласованно).

10. Построена теория диэлектрического состояния в двумерном гранулированном сверхпроводнике с хорошей межгранульной проводимостью под действием магнитного поля в предположении шахматного порядка чередования сверхпроводящих и нормальных гранул (в последнем случае сверхпроводимость предполагается подавленной магнитным полем из-за разброса в размерах гранул).

11. Исследовано влияние магнитного поля и кулоновского взаимодействия на эффект близости в контакте между сверхпроводником и гранулой из нормального металла в пределе хорошей проводимости границы. Показано, что возможны три фазы нормальной гранулы: сильное и слабое сверхпроводящее (т.е. щелевое), а также нормальное (т.е. бесщелевое) состояние; исследованы фазовые переходы между ними. Показано, что туннельная плотность состояний в нормальной грануле может содержать две щели, соответствующие эффекту близости (минищель) и кулоновской блокаде (кулоновская щель).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что развитые в диссертационной работе методы и полученные результаты могут быть использованы для описания широкого круга явлений в мезоскопических системах, совмещающих в себе сверхпроводящие и магнитные свойства, в частности для выяснения особой роли нечётных по частоте сверхпроводящих состояний. С помощью предложенных подходов и на основании полученных результатов возможно дальнейшее развитие теории.

1. Все полученные результаты могут быть применены для анализа экспериментальных данных. В ряде случаев такие данные уже доступны, и сравнение показывает хорошее согласие теории и эксперимента. В остальных случаях предсказанные эффекты могут служить мотивацией для новых

экспериментов.

2. Ряд результатов, касающихся различных проявлений нечётной по частоте сверхпроводимости, может быть использован для экспериментальной идентификации этого состояния, поскольку прямых методов идентификации частотной симметрии нет.
3. Результаты по классификации сверхпроводящих состояний при учёте нечётных по частоте состояний с разным типом мейснеровского отклика разъясняют неопределённость, существовавшую в литературе. Согласно представленным результатам, нечётные по частоте диамагнитные состояния не могут возникать как однородные объёмные состояния, т.к. не существует физически допустимых возмущений, которые могли бы зафиксировать фазу и таким образом привести к нарушению калибровочной симметрии.
4. Представленные результаты по импедансу на поверхности кирального р-волнового сверхпроводника и их сравнение с экспериментом свидетельствуют в пользу именно такого состояния в рутенате стронция  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  (хотя это состояние считается главным, вопрос не закрыт окончательно, поэтому важны дополнительные подтверждения).
5. Впервые предсказанные в SFF системах эффекты триплетного спинового клапана и обратного переключения послужили мотивацией для эксперимента. Проведённые эксперименты продемонстрировали наличие обоих предсказанных эффектов.
6. Продемонстрирована возможность эффективного описания слабого магнитного беспорядка с произвольной корреляционной длиной как рассеяния с переворотом спина в задаче об эффекте близости в диффузной системе, составленной из сверхпроводящих и нормальных (или ферромагнитных) областей с магнитным беспорядком. Такого рода описание ранее использовалось для анализа эксперимента эмпирически. Представленная теория даёт микроскопическое обоснование эмпирического подхода.
7. Результаты, касающиеся диссипации в сверхпроводниках с неборновскими магнитными примесями, показывают, что примесные состояния,

возникающие при малых плотностях магнитных примесей, экспериментально могут использоваться в качестве ловушек для неравновесных квазичастиц, уменьшая поглощение в некотором диапазоне низких частот электромагнитного поля.

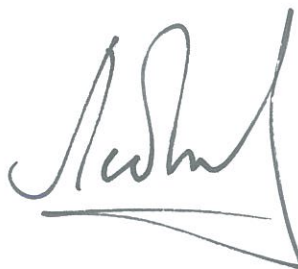
Достоверность результатов исследования обеспечивается надёжностью применявшихся аналитических методов, согласием с теоретическими результатами, полученными в других работах, и согласием с данными физических и численных экспериментов, выполненных другими авторами.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач, разработке оригинальных методов исследования, непосредственном проведении как аналитических расчетов, так и численного моделирования, описанных в диссертации.

На заседании 28.06.2019 диссертационный совет принял решение присудить Фоминову Я.В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель  
диссертационного совета Д.002.207.01  
член-корр. РАН



В. В. Лебедев

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.002.207.01  
доктор физ.-мат. наук



П. Г. Гриневич

28 июня 2019 г.

М.П.

